

DISPOSITIF LASER A SOLIDE MONOLITHIQUE POMPE PAR DIODE LASER, ET PROCEDE MIS EN
OEUVRE DU DISPOSITIF.

5

La présente invention se rapporte à un dispositif
laser à solide monolithique pompé par diode laser, et
concerne plus particulièrement le laser à solide doublé
10 intra-cavité monomode. Elle se rapporte également à un
procédé mis en œuvre dans un tel dispositif.

La présente invention trouve une application
particulièrement intéressante, mais non exclusive, dans le
domaine de la génération de luminescence laser bleue ou
15 verte.

L'émission laser d'un faisceau de bonne qualité
spatiale et spectrale dans le visible à 473 nm par exemple,
à partir d'une diode multimode présente beaucoup d'intérêt
pour des applications industrielles et médicales notamment.
20 Cette longueur d'onde, dite harmonique, peut s'obtenir à
partir du doublage en fréquence d'une émission laser à une
longueur d'onde, dite fondamentale, à 946 nm du grenat
d'aluminium et yttrium dopé au néodyme (Nd:YAG).

D'une façon générale, un laser doublé intra-cavité
25 comprend une diode laser pour pomper un laser à solide, tel
que le Nd:YAG par exemple, formant amplificateur à 946 nm.
Pour réaliser le doublage, on associe à l'amplificateur un
cristal non linéaire convertissant le signal fondamental
proche infrarouge en signal visible par doublage
30 fréquentiel ("frequency doubling" en langue anglaise, aussi
nommé "second harmonic generation SHG"). On obtient ainsi
une longueur d'onde fondamentale divisée par deux.
L'amplificateur et le cristal non linéaire sont contenus
dans une cavité dont les deux surfaces extrêmes opposées
35 dans le trajet du faisceau laser sont réfléchives pour
certaines longueurs d'onde.

Cependant, si l'on s'intéresse à une émission continue, la puissance de l'émission fondamentale est inférieure à la puissance de la diode laser et le doublage de fréquence est alors très inefficace.

5 On connaît le brevet américain US 4 809 291, intitulé " Diode pumped laser and doubling to obtain blue light", dans lequel R.L. Byer et T.Y. Fan proposent un doublage intra-cavité pour augmenter la puissance d'une onde fondamentale à 946 nm et ainsi augmenter l'efficacité de
10 doublage.

Dans un article intitulé "Efficient blue emission from an intracavity-doubled 946 nm Nd:YAG laser" publié en 1988 dans la revue Optics Letters (vol. 13, pp. 137-139); Dixon et al. présentent une émission de 5 mW de bleu (473 nm) par
15 un micro-laser à base de Nd:YAG doublé intra-cavité. La concentration du Nd est de 1.1 at.%. L'efficacité de doublage n'est que de 2%.

Le problème principal de ces lasers doublés intra-cavité est la présence de modes axiaux et de polarisation
20 parasites qui réduisent l'efficacité du laser et qui sont à l'origine de fortes fluctuations de puissance. En exemple, Matthews et al., dans un article intitulé "Diode pumping in a blue (473 nm) Nd:YAG/KNbO₃ microchip laser" (CLEO'96, vol. 9, p. 174) produisent 26.5 mW de bleu avec des fluctuations
25 d'intensité supérieures à 10%.

Plus précisément, le doublage de fréquence intra-cavité induit des pertes sélectives qui sont croissantes avec la puissance de pompe pour l'émission laser dominante. Lorsque l'efficacité de doublage augmente, l'inversion de
30 population moyenne de la cavité doit augmenter pour compenser l'excès de perte. Toutefois, cela permet aux modes adjacents et à l'émission de polarisation orthogonale de commencer à laser. Pour les modes adjacents, cet effet s'ajoute à celui du "hole burning spatial" qui permet déjà
35 aux modes adjacents de laser.

Les différents modes lasant dans la cavité sont couplés dans le milieu amplificateur (compétition pour le gain) et dans le milieu doubleur de fréquence (addition de fréquences). Ces couplages sont non linéaires et
5 participent à une dynamique non linéaire complexe. Cette dernière se traduit par une fluctuation de puissance forte voire chaotique.

Si le doublage de fréquence est de "Type I", les modes de polarisation orthogonale ne subissent pas de doublage de
10 fréquence efficace (absence d'adaptation de phase entre le fondamental et l'harmonique). Ces modes stabilisent l'inversion de population en croissant avec la puissance de pompe. Ils ralentissent l'efficacité de conversion qui a besoin d'une augmentation d'inversion de population pour
15 croître. Seuls des effets de "hole burning spatial" autorisent une légère croissance de l'efficacité de conversion.

Plusieurs méthodes ont été présentées pour rendre le laser monomode ou pour découpler les modes dans le cristal
20 non linéaire. Elles peuvent être rangées dans trois catégories :

a) La première est l'introduction d'un étalon dans la cavité. Cette méthode, divulguée notamment dans le brevet américain US 5,838,713 de Y. Shimoji, pose plusieurs
25 problèmes. En effet, l'étalon induit des pertes dans la cavité, sauf s'il est formé par les faces du YAG et du cristal doubleur. Dans ce dernier cas, il requiert une très grande précision de positionnement (sub-micrométrique) difficile à obtenir de manière industrielle et à
30 stabiliser. Une manière de résoudre ce problème est de contacter optiquement le milieu amplificateur avec le cristal doubleur en incluant un angle sur une partie de la face de contact. Cet angle induit un petit espacement d'air entre les deux matériaux. Cette méthode fragilise le
35 contact et donc l'intégrité d'un laser-monolithique et ne permet pas la protection de l'interface par une colle.

b) La seconde catégorie joue sur la polarisation du fondamental. Le milieu amplificateur peut être inséré entre deux lames quart d'onde pour éviter l'effet "hole burning spatial", voir notamment G. Hollemann et al., dans
5 "Frequency-stabilized diode-pumped Nd:YAG laser at 946 nm with harmonics at 473 nm and 237 nm", Opt. Lett. 19, p.192 en février 1994. Un inconvénient de cette méthode est l'introduction de pertes dans la cavité.

Par doublage de Type I, on entend une réalisation dans
10 laquelle le faisceau laser fondamental se propage sur l'un des axes optiques du cristal (en général l'axe lent) et le faisceau laser harmonique se propage sur l'autre axe optique du cristal, orthogonal au premier. On fait du doublage de type I lorsqu'il est possible de couper le
15 cristal de manière à égaler l'indice de réfraction d'un axe optique à la longueur d'onde fondamentale avec l'indice de réfraction de l'autre axe optique à la longueur d'onde harmonique. C'est le cas du KNbO_3)

Par doublage de type II, on entend une réalisation
20 dans la quelle le faisceau laser fondamental est présent sur les deux axes et le coefficient de conversion est optimisé lorsque la polarisation du laser fondamental fait un angle de 45° par rapport aux axes optiques.

c) La troisième méthode consiste à réduire la longueur
25 de la cavité. Elle a été proposée par A. Mooradian dans le brevet US 5,256,164 oct. 1993. Pour une largeur de raie d'émission à 946 nm de 1 nm (comparée à 0.6 nm pour la raie à 1.064 μm), la formule de Mooradian impose une longueur de cavité inférieure à 300 μm , incluant le YAG et le KNbO_3 . La
30 concentration en Nd dans les microchips publiés ou brevetés à ce jour n'excède pas 1.1 at.%. Cela correspond à une atténuation de 0.85 mm^{-1} à 808.4 nm, c'est à dire 8.1 % de pompe absorbée par 100 μm d'épaisseur et 15.6% de pompe absorbée par 200 μm . D'autre-part, les 100 ou 200 nm de
35 KNbO_3 n'apportent pas une efficacité de conversion

suffisante. Ainsi, un laser microchip suivant l'inégalité de Mooradian semble ne pas être en mesure d'émettre plus de quelques mW de bleu avec 1 W de pompe d'une diode laser.

Par ailleurs, on connaît une méthode efficace proposée
5 par T. Y. FAN., "Single-Axial Mode, Intracavity Doubled Nd:YAG Laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol27, 09sept1991, pour rendre un laser doublé intra-cavité mono-fréquence. Dans cette méthode, le milieu amplificateur (Nd:YAG) est coupé à l'angle de Brewster par rapport à
10 l'air. Le cristal non linéaire, biréfringent, est attaqué à 45° par le fondamental (doublage de type II). La fenêtre de Brewster induit des pertes importantes à la polarisation orthogonale et l'empêche de laser. Elle induit également des pertes à toute longueur d'onde dont la polarisation a
15 été tournée par le cristal biréfringent. Cette modulation de perte en fonction de la longueur d'onde peut rendre le laser monomode. Cette méthode ne s'applique cependant pas à un doublage de fréquence de Type I car le signal à la fréquence fondamentale est sur l'un des axes optiques du
20 cristal non linéaire. D'autre part, à cause de la double réfraction, il n'est pas possible d'accoler le cristal amplificateur coupé à l'angle de Brewster avec le cristal non linéaire. En effet, la double réfraction introduit des effets de phase qui font que les faisceaux réfléchis par la
25 face externe de la cavité ne se recombinent pas lorsqu'ils retournent dans l'amplificateur.

La présente invention vise à remédier à la plupart des
inconvénients précités en proposant un laser à solide
doublé intra-cavité qui présente une dimension compacte,
30 offre une grande stabilité de fonctionnement, et autorise des doublages de fréquence de Type I et II. Un autre but de l'invention est de proposer un laser à solide accordable capable de fonctionner en monomode. L'invention a encore pour but un laser à solide puissant quel que soit le niveau
35 de puissance de la diode laser de pompage.

On atteint au moins l'un des buts précités avec un dispositif laser comprenant :

- un moyen de pompage optique, de préférence une diode laser,
- 5 - un milieu amplificateur excité par un faisceau laser de longueur d'onde fondamentale émis par le moyen de pompage optique, la face de sortie de ce milieu amplificateur étant coupée selon l'angle de Brewster pour ladite longueur d'onde fondamentale, et
- 10 - un cristal biréfringent de doublage de fréquence.

Selon l'invention, le dispositif comprend en outre un milieu isotrope intercalé entre la face de sortie du milieu amplificateur et la face d'entrée du cristal biréfringent, le milieu amplificateur et le cristal biréfringent étant
15 solidaires l'un de l'autre de façon à constituer une cavité résonnante monolithique ou composite. De plus, l'axe cristallin "c" du cristal biréfringent fait un angle θ_c non nul par rapport à la direction orthogonale de la polarisation de l'onde fondamentale, définie par la surface
20 de Brewster.

Avec ce dispositif selon l'invention, l'interface entre le milieu isotrope et le cristal biréfringent est proche de la normale. Ce milieu isotrope intercalaire permet de limiter les effets de la double réfraction du
25 cristal biréfringent : en effet, lorsque l'angle d'incidence tend vers la normale, l'angle de la double réfraction tend vers zéro. On peut ainsi solidariser le milieu amplificateur avec le cristal biréfringent (le doubleur) de façon à obtenir un composant compact, ce qui
30 n'est pas le cas dans le document de T. Y. Fan de 1991.

La combinaison d'une interface à l'angle de Brewster et d'un cristal biréfringent hors axe permet de sélectionner un unique mode. En effet, l'interface de Brewster induit une perte sélective à la polarisation
35 orthogonale. Seules les longueurs d'ondes pour lesquelles

le déphasage dû à la biréfringence est un multiple de 2π conservent la polarisation à faible perte à l'interface de Brewster. En ajustant notamment la longueur du cristal non linéaire, il est possible de ne sélectionner qu'un unique
5 mode dans la bande d'émission. En d'autres termes, l'indice du milieu isotrope et l'angle θ_c associés à la longueur de la cavité peuvent être ajustés afin de n'autoriser qu'un seul mode dans la cavité.

Ainsi, même dans le cas d'un doublage de type II, il
10 peut être judicieux de prendre un angle θ_c différent de 45° .

Par ailleurs, lorsque l'efficacité de doublage est forte, il est possible d'augmenter les pertes des modes adjacents en augmentant θ_c .

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention,
15 la face d'entrée et/ou la face de sortie du cristal biréfringent est coupée selon un léger angle ε par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser. Ainsi les faces d'entrée et de sortie ne sont plus tout à fait parallèles. Cette caractéristique est remarquable par
20 le fait que, dans les doublages conventionnels, l'angle ε est toujours égal à zéro afin d'éviter toute double réfraction. Imposer un angle ε non nul va donc à l'encontre des pratiques conventionnelles. En fonction des caractéristiques du dispositif (dimension de la cavité,
25 indice, θ_c , ...) l'homme du métier peut déterminer un angle ε max au delà duquel le spectre de transmission au niveau de la face de Brewster ne présente plus de pic de transmission. A titre d'exemple, ε peut être choisi inférieur ou égal à 1° .

30 Cet angle ε induit une légère double réfraction dans les deux orientations parallèle et orthogonale. Il peut être introduit dans la dimension parallèle à la polarisation. La légère-double réfraction alors introduite dans le trajet du signal peut être compensée par la

lentille thermique induite par la pompe dans la mesure où ε est faible. Mais, de préférence, ε est introduit dans la dimension orthogonale à la polarisation.

D'une façon générale, cet angle ε permet
5 avantageusement de faire varier la longueur du cristal biréfringent par simple translation de la pompe (et donc du signal). Cette variation de longueur permet d'accorder la fréquence de la cavité.

Selon l'invention, le plan orthogonal à la direction
10 de propagation de l'onde fondamentale peut avantageusement contenir l'axe cristallin "c", et faire un angle par rapport aux axes "a" et "b" du cristal biréfringent de façon à obtenir un accord de phase à la température de fonctionnement entre l'onde fondamentale et l'onde
15 harmonique (onde doublée).

La taille de la cavité n'est plus le seul paramètre modifiable pour obtenir un fonctionnement monomode. Le choix judicieux des milieux, de leur indice de réfraction et de leur dimension, de l'orientation du cristal
20 biréfringent, permet un fonctionnement monomode et stable.

Le milieu amplificateur peut être constitué par le grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd). Ce cristal peut être de forme cylindrique avec une face d'entrée formant un miroir plan.

25 Le cristal biréfringent est avantageusement constitué à partir du niobate de potassium (KNbO_3).

Selon une première variante de l'invention, le milieu isotrope est un matériau cristallin constitué à partir du tantalate de potassium (KTaO_3). Les trois milieux sont alors
30 accolés les uns aux autres.

Selon une seconde variante de l'invention, le milieu isotrope est l'air. Dans ce cas, l'état de surface de la face de sortie de l'amplificateur et de la face d'entrée du cristal biréfringent ne requiert pas une pureté excessive.

De préférence, on prendra soin de choisir un milieu isotrope constitué par un cristal isotrope dont l'indice de réfraction est proche, par exemple à 10% près, de l'indice de réfraction du cristal biréfringent. Cela minimise les effets de double réfraction et permet donc une tolérance plus grande sur l'angle d'attaque du signal par rapport à l'interface (autour de la normale).

Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un procédé dans lequel on fait varier le chemin optique parcouru par le faisceau laser en faisant translater le faisceau laser émis par le moyen de pompage par rapport à la face d'entrée de l'amplificateur. Plus précisément, on déplace le faisceau laser selon un plan dans lequel la distance parcourue par ce faisceau laser dans l'amplificateur varie en fonction de la latitude de la traversée.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de mise en œuvre nullement limitatif, et des dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue en coupe schématique d'un dispositif laser comportant trois cristaux accolés selon l'invention;

- les figures 2 à 7 sont des graphes illustrant le niveau de puissance des différents modes régnant dans la cavité résonante du dispositif de la figure 1; et

- la figure 8 est une vue en coupe schématique d'une variante du dispositif selon l'invention dans lequel le matériau intermédiaire est remplacé par l'air ambiant.

Bien que l'invention n'y soit pas limitée, on va maintenant décrire un dispositif laser monolithique doublé en fréquence en intra-cavité comportant un laser Nd:YAG émettant à 946 nm, doublé intra-cavité à 473 nm avec un cristal de KNbO_3 .

En référence à la figure 1, on voit une diode laser de pompage 10 émettant un faisceau laser 11 à 808 nm vers une

cavité 1 composée d'un assemblage de trois cristaux 2, 3 et 4. Le cristal amplificateur 2 est du Nd:YAG. Son indice de réfraction est $n_1 = 1.82$ à 946 nm. La face d'entrée 6 de ce cristal 2 est traitée de façon à constituer un miroir plan. Sa face de sortie 7 est taillée à l'angle de Brewster calculé à partir de l'indice n_1 et de l'indice n_2 du cristal isotrope 3. Les deux cristaux 2 et 3 sont accolés l'un à l'autre sur une partie de la face 7.

Le cristal isotrope 3 est constitué de tantalate de potassium KTaO_3 d'indice n_2 égale à 2.179 à 946 nm. Sur sa face de sortie 8, on accole un cristal doubleur de fréquence biréfringent 4 constitué de niobate de potassium KNbO_3 dont l'indice de réfraction et le diamètre sont sensiblement identiques à ceux du cristal isotrope 3.

Les deux cristaux 3 et 4 ont leurs axes géométriques colinéaires. Le cristal isotrope 3 est taillé à la face 7 de telle sorte que le faisceau laser 5 sortant du Nd:YAG 2 et dévié par la face 7, traverse les cristaux 3 et 4 parallèlement à leurs axes géométriques.

La face d'entrée 6 du Nd:YAG 2 et la face de sortie 9 du KNbO_3 4 sont traitées de façon conventionnelle afin de constituer une cavité résonnante. Le faisceau sortant de la face 9 peut être à 946 nm ou à 473 nm.

Le schéma de la figure 1 est basé sur une polarisation verticale du signal à 946 nm dans le Nd:YAG. L'axe vertical est situé dans le plan de la figure, l'axe horizontal étant perpendiculaire à ce plan. L'homme du métier saura aisément adapter ce schéma pour une polarisation linéaire horizontale ou quelconque.

Dans le cristal biréfringent KNbO_3 , la face d'entrée 8 contient l'axe c et coupe le plan ab selon un angle $\phi = 32^\circ$ par rapport à l'axe b de façon à obtenir un accord de phase entre les longueurs d'onde 946 nm et 473 nm à 308 K. L'homme du métier saura modifier cet angle pour une adaptation de phase à d'autres températures. A 946 nm, l'indice de réfraction sur l'axe c est $n_{3f} = 2.127$ et

l'indice de réfraction sur l'axe orthogonal est $n_{3s} = 2.238$. La biréfringence est donc caractérisée par $\Delta n_3 = 0.111$

L'angle de la face 7 φ_a est l'angle de Brewster entre le YAG et le KTaO_3 . Il est déterminé par la relation $\tan(\varphi_a) = n_2/n_1$. La face 8 est coupée à un angle ε de la normale à la direction de propagation du faisceau à 946 nm émis orthogonalement à la face d'entrée 6. φ_b et φ_c sont respectivement les angles des faces 8 et 9, et sont déterminés par $\varphi_b \cong 2\varphi_a - \pi/2 + \varepsilon$ et $\varphi_c \cong 2\varphi_a - \pi/2 + \varepsilon_1$, ε_1 ayant des valeurs préférentielles comprises entre $\varepsilon(1-n_2/n_{3s})$ et $\varepsilon(1-n_2/n_{3f})$. La tolérance sur φ_b est de l'ordre de 1° , elle est limitée par les effets de double réfraction. La tolérance sur φ_c est inférieure à quelques minutes d'angles, car c'est cette dernière face qui referme la cavité.

Encore sur la figure 1, pour " y " = 0, sur l'axe vertical, le signal se propage sur 2 mm dans chacun des trois cristaux 2, 3 et 4. Les distances respectives de propagation dans les trois milieux pour " y " < 0 se déduisent aisément des trois angles φ_a , φ_b et φ_c . La distance optique L_o , produit des distances et des indices se calcule aisément en fonction de " y ". L'angle ε est choisi égal à 0.003 rad ou $10'$ d'angle. Les fréquences optiques pouvant se propager dans la cavité sont proportionnelles à $C/2L$ avec C la vitesse de la lumière dans le vide. Elles sont représentées par des croix et des cercles sur les figures 2 à 7.

Les figures 2 à 7 montrent les pertes induites par la face 7 à l'angle de Brewster lors d'un aller-retour dans la cavité constituée par les trois cristaux 2, 3 et 4 pour un signal se propageant avec une polarisation verticale et horizontale. L'angle de coupe du cristal biréfringent 4, c'est à dire l'angle de l'axe c avec l'horizontal, est $\theta_c = 0.3$ rad. Le milieu amplificateur 2 est susceptible

d'apporter du gain sur une bande de 1 nm centrée autour de 946.6 nm. Les pertes de l'ensemble des modes amplifiés sont calculées puis reportées sur les figures 2 à 7. Sur la figure 2, les pertes de la polarisation orthogonale sont également représentées (sous forme de cercles). Elles ne sont pas représentées par la suite, car elles sont trop importantes pour permettre une oscillation laser.

La polarisation du signal fondamental est la verticale dans le cas présenté. Si l'axe c était horizontal, les axes optiques seraient horizontaux et verticaux. Le signal fondamental se propagerait alors dans un axe de la biréfringence et sa polarisation ne pourrait plus être tournée. Si l'axe c et donc les axes de biréfringence sont tournés comme dans le cas présent, le fondamental n'est plus dans les axes de biréfringence et sa polarisation est donc tournée lors de la propagation dans le cristal. La sélection de mode par rotation de polarisation peut alors jouer.

La position verticale "y" du faisceau laser est variée sur les figures 3 à 7. Lorsque "y" remonte de -1.4 mm à -0.8 mm, l'ensemble des longueurs d'onde de la bande d'émission peut être sélectionné successivement. Nous voyons sur les figures 4 et 5 que le choix judicieux de n_2 , de la longueur du cristal 4 biréfringent KNbO_3 et de θ_c permettent de ne sélectionner qu'un unique mode. Le faible rapport n_2/n_1 , permet notamment une faible largeur du pic de transmission, rendant le filtre très sélectif. L'angle θ_c peut être augmenté pour induire plus de pertes sur les modes adjacents. Il suffit d'un déplacement vertical de 1.2 mm pour retrouver la même sélection de mode (voir sur les figures 3 et 7). Le laser est donc monomode et accordable par une simple translation des cristaux par rapport à la diode laser.

Sur la figure 8 est représentée une variante préférentielle du dispositif selon l'invention dans lequel le milieu isotrope est constitué par l'air.

Le dispositif de pompage n'est pas représenté.

La face de sortie 14 du laser Nd:YAG 12 est taillée selon l'angle de Brewster. Une partie supérieure de cette face 14 est destinée au passage du faisceau laser à 946 nm.

5 Sur une partie inférieure de la face 14, on accole un cristal biréfringent 13 à base de KNbO_3 . Ce dernier est taillé de telle sorte que le faisceau laser 16 sortant du Nd:YAG et ayant traversé l'air, atteint la face d'entrée 17 de ce cristal 13. Dans le trajet du faisceau laser, aucun

10 matériau n'est disposé entre la face de sortie 14 du laser Nd:YAG et la face d'entrée 17 du cristal biréfringent 13. L'avantage d'une telle variante est une exigence moindre quant à l'état des surfaces sur la zone d'encollage 15.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples

15 qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Dispositif laser comprenant :

- un moyen de pompage optique (10),
 - 5 - un milieu amplificateur (2) excité par un faisceau laser (11) de longueur d'onde fondamentale émis par le moyen de pompage optique, la face de sortie (7) de ce milieu amplificateur étant coupée selon l'angle de Brewster pour ladite longueur d'onde fondamentale, et
 - 10 - un cristal biréfringent (4) de doublage de fréquence;
- caractérisé en ce qu'il comprend en outre un milieu isotrope (3) intercalé entre la face de sortie (7) du milieu amplificateur et la face d'entrée (8) du cristal
- 15 biréfringent, le milieu amplificateur (2) et le cristal biréfringent (4) étant solidaires l'un de l'autre de façon à constituer une cavité résonnante monolithique; et en ce que l'axe cristallin "c" du cristal biréfringent fait un
- 20 angle θ_c non nul par rapport à la direction orthogonale de la polarisation de l'onde fondamentale, définie par la surface de Brewster.

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la face d'entrée (8) du cristal biréfringent est coupée
- 25 selon un léger angle ε par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser (5).

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la face de sortie (9) du cristal biréfringent est
- 30 coupée selon un léger angle ε par rapport à la normale à la direction de propagation du faisceau laser (5).

4. Dispositif selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que ~~l'angle ε est inférieur ou égal à un degré.~~

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le plan orthogonal à la direction de propagation de l'onde fondamentale contient l'axe cristallin "c", ce plan faisant un angle par rapport aux axes "a" et "b" du cristal biréfringent de façon à obtenir un accord de phase à la température de fonctionnement entre l'onde fondamentale et l'onde harmonique.
6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (2) est constitué par le grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd).
7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (2) est un Nd:YAG cylindrique dont la face d'entrée constitue un miroir plan.
8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moyen de pompage (10) est une diode laser.
9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le cristal biréfringent (4) est constitué à partir du niobate de potassium (KNbO_3).
10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu isotrope est l'air.
11. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le milieu isotrope est constitué à partir du tantalate de potassium (KTaO_3).
12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le milieu isotrope est constitué

par un cristal isotrope dont l'indice de réfraction est proche, tel qu'à dix pourcent près, de l'indice de réfraction du cristal biréfringent.

- 5 13. Procédé mis en œuvre dans un dispositif laser selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'on fait varier le chemin optique
parcouru par le faisceau laser en faisant translater le
faisceau laser émis par le moyen de pompage par rapport à
10 la face d'entrée de l'amplificateur.

1 / 2

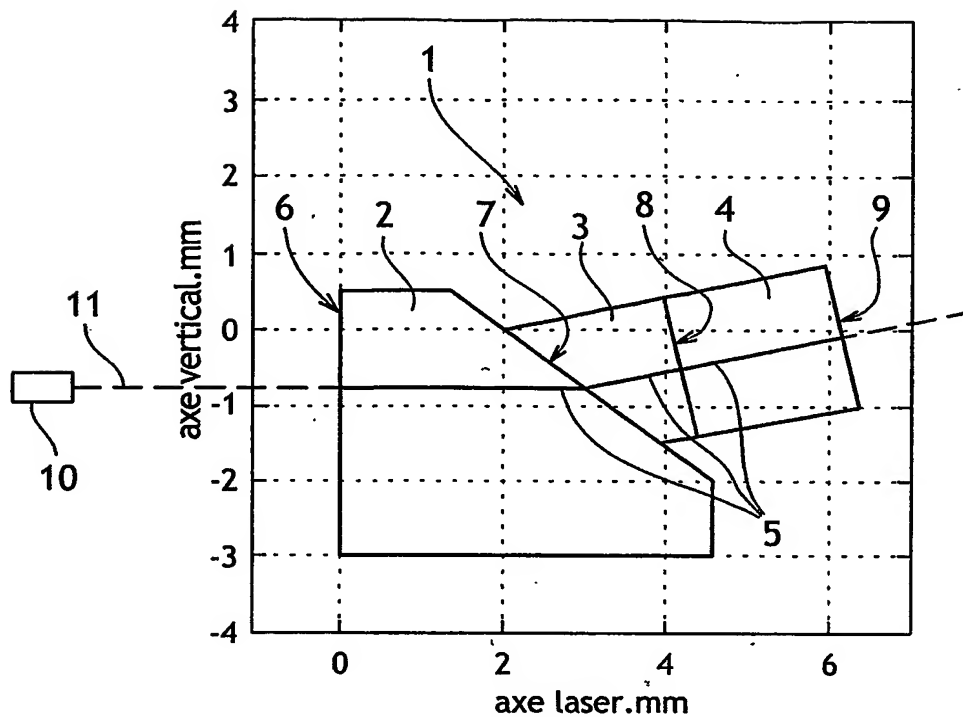


FIG.1

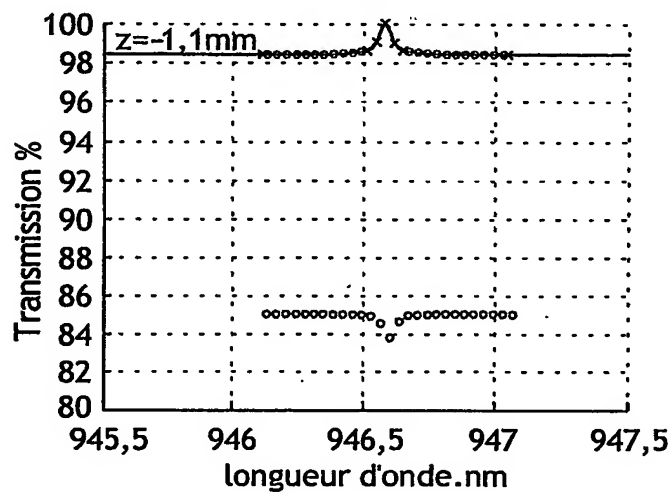


FIG.2

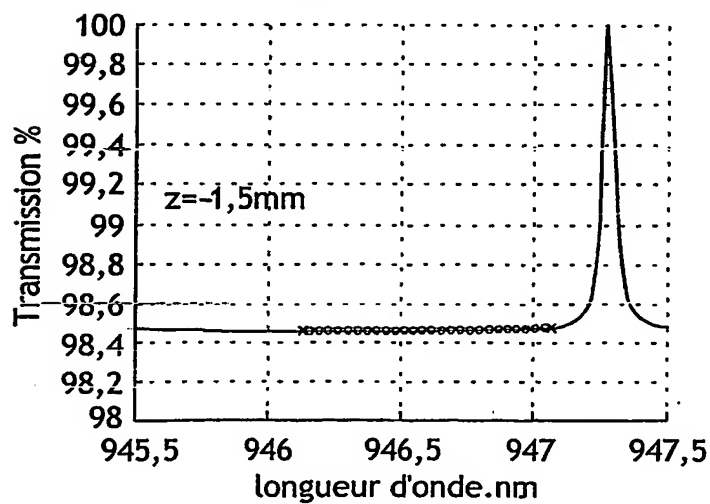
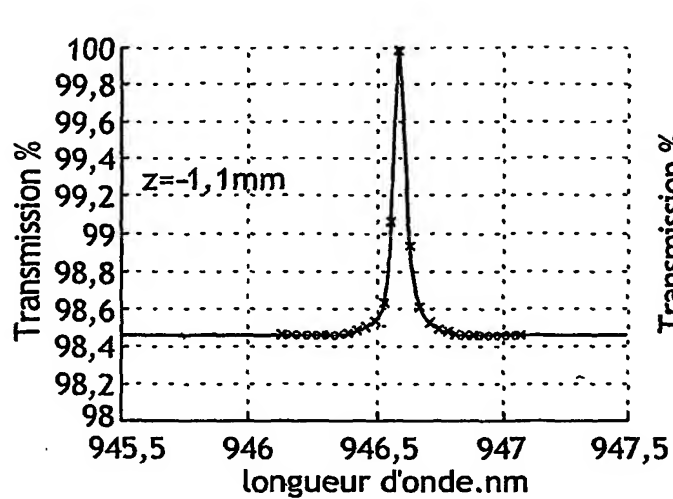
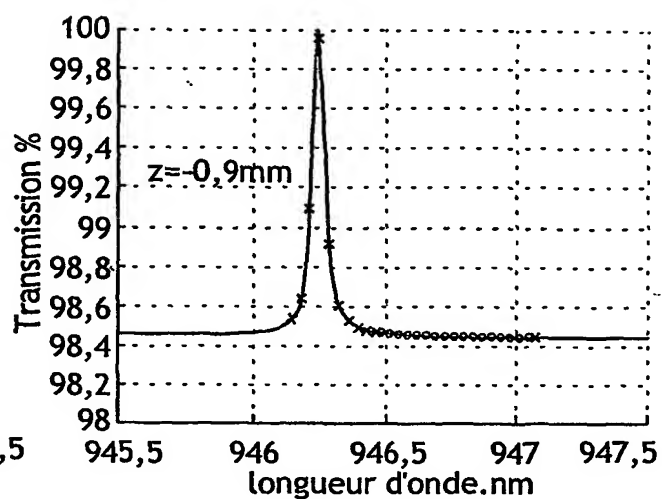
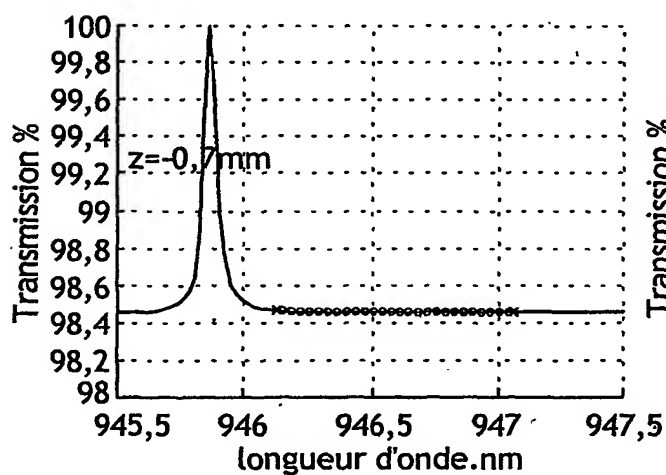
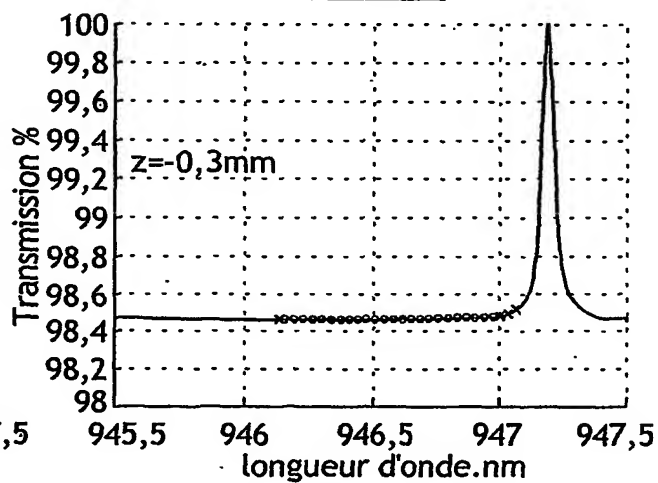
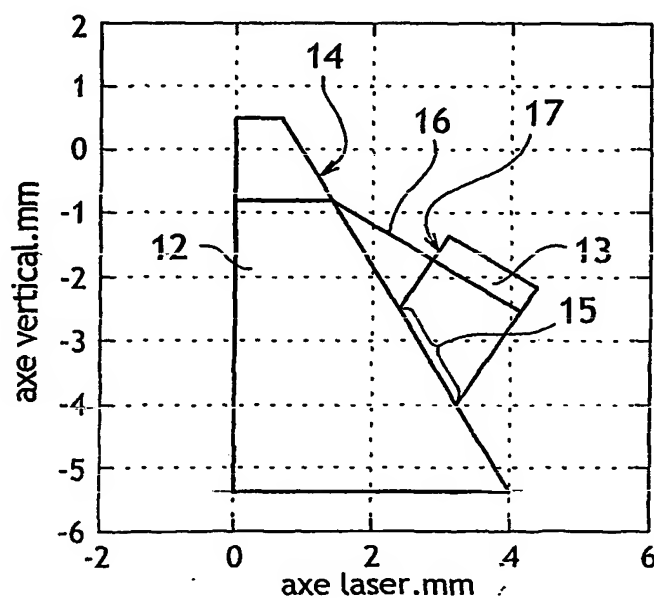


FIG. 3

2 / 2

FIG.4FIG.5FIG.6FIG.7FIG.8

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 H01S3/109

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FAN T Y: "SINGLE-AXIAL MODE, INTRACAVITY DOUBLED ND:YAG LASER" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, IEEE INC. NEW YORK, US, vol. 27, no. 9, 1 September 1991 (1991-09-01), pages 2091-2093, XP000234357 ISSN: 0018-9197 cited in the application the whole document	1-13
A	US 4 809 291 A (BYER ROBERT L ET AL) 28 February 1989 (1989-02-28) cited in the application	1-12
A	column 2, line 41 - line 63 column 4, line 3 - line 18 claims 3,12	11

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

~~"F" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another document or other special reason (as specified)~~

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

~~"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed~~

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 February 2005

Date of mailing of the international search report

25/02/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Bésuelle, E

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 256 164 A (MOORADIAN ARAM) 26 October 1993 (1993-10-26) cited in the application column 6, line 35 - line 50	1-13
A	BAUMERT J-C ET AL: "HIGH-EFFICIENCY INTRACAVITY FREQUENCY DOUBLING OF A STYRYL-9 DYE LASER WITH KNBO3 CRYSTALS" APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 24, no. 9, 1 May 1985 (1985-05-01), pages 1299-1301, XP000709425 ISSN: 0003-6935 abstract	9
A	US 3 502 958 A (FLEURY PAUL A ET AL) 24 March 1970 (1970-03-24) column 3, line 24 - line 41	11
A	US 4 761 059 A (KHOSHNEVISAN MOHSEN ET AL) 2 August 1988 (1988-08-02) column 1 - column 3	11
A	DIXON G J ET AL: "EFFICIENT BLUE EMISSION FROM AN INTRACAVITY-DOUBLED 946-NM ND:YAG LASER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 13, no. 2, 1 February 1988 (1988-02-01), pages 137-139, XP000710564 ISSN: 0146-9592 cited in the application page 137	1-11
A		9
A	LIU L ET AL: "KNBO3 TEMPERATURE-TUNED BLUE LASER" OPTICAL ENGINEERING, SOC. OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS. BELLINGHAM, US, vol. 38, no. 11, November 1999 (1999-11), pages 1789-1793, XP000928186 ISSN: 0091-3286 abstract	1-11
A		9
A	MATTHEWS D G ET AL: "BLUE MICROCHIP LASER FABRICATED FROM ND:YAG AND KNBO3" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 21, no. 3, 1 February 1996 (1996-02-01), pages 198-200, XP000629023 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document abstract	1-13
A		9
	----- -/--	

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	HOLLEMANN G ET AL: "FREQUENCY-STABILIZED DIODE-PUMPED ND:YAG LASER AT 946 NM WITH HARMONICS AT 473 AND 237 NM" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 19, no. 3, 1 February 1994 (1994-02-01), pages 192-194, XP000424362 ISSN: 0146-9592 cited in the application the whole document	1-13
A	US 5 206 867 A (ESTEROWITZ LEON ET AL) 27 April 1993 (1993-04-27) the whole document	1-13

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4809291	A	28-02-1989	US 4739507 A	19-04-1988
US 5256164	A	26-10-1993	US 4860304 A	22-08-1989
			US 4953166 A	28-08-1990
			US 5265116 A	23-11-1993
			US 5402437 A	28-03-1995
			US 5365539 A	15-11-1994
			AT 110499 T	15-09-1994
			CA 1292797 C	03-12-1991
			DE 68917610 D1	29-09-1994
			DE 68917610 T2	15-12-1994
			EP 0327310 A2	09-08-1989
			EP 0571051 A1	24-11-1993
			ES 2059716 T3	16-11-1994
			JP 2005490 A	10-01-1990
			JP 2074861 C	25-07-1996
			JP 7112082 B	29-11-1995
			US 5115445 A	19-05-1992
			AU 637787 B2	10-06-1993
			AU 5199590 A	05-09-1990
			CA 2046637 A1	10-08-1990
			CN 1045200 A	05-09-1990
			EP 0457846 A1	27-11-1991
			JP 4503429 T	18-06-1992
			WO 9009688 A1	23-08-1990
US 3502958	A	24-03-1970	NONE	
US 4761059	A	02-08-1988	NONE	
US 5206867	A	27-04-1993	NONE	

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 H01S3/109

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 H01S

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FAN T Y: "SINGLE-AXIAL MODE, INTRACAVITY DOUBLED ND:YAG LASER" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, IEEE INC. NEW YORK, US, vol. 27, no. 9, 1 septembre 1991 (1991-09-01), pages 2091-2093, XP000234357 ISSN: 0018-9197 cité dans la demande le document en entier	1-13
A	US 4 809 291 A (BYER ROBERT L ET AL) 28 février 1989 (1989-02-28) cité dans la demande	1-12
A	colonne 2, ligne 41 - ligne 63 colonne 4, ligne 3 - ligne 18 revendications 3,12	11
	----- -/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

A document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

E document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

L document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

O document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

P document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

G document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

17 février 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

25/02/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Bésuelle, E

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 5 256 164 A (MOORADIAN ARAM) 26 octobre 1993 (1993-10-26) cité dans la demande colonne 6, ligne 35 - ligne 50 -----	1-13
A	BAUMERT J-C ET AL: "HIGH-EFFICIENCY INTRACAVITY FREQUENCY DOUBLING OF A STYRYL-9 DYE LASER WITH KNBO3 CRYSTALS" APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 24, no. 9, 1 mai 1985 (1985-05-01), pages 1299-1301, XP000709425 ISSN: 0003-6935 abrégé -----	9
A	US 3 502 958 A (FLEURY PAUL A ET AL) 24 mars 1970 (1970-03-24) colonne 3, ligne 24 - ligne 41 -----	11
A	US 4 761 059 A (KHOSHNEVISAN MOHSEN ET AL) 2 août 1988 (1988-08-02) colonne 1 - colonne 3 -----	11
A	DIXON G J ET AL: "EFFICIENT BLUE EMISSION FROM AN INTRACAVITY-DOUBLED 946-NM ND:YAG LASER" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 13, no. 2, 1 février 1988 (1988-02-01), pages 137-139, XP000710564 ISSN: 0146-9592 cité dans la demande	1-11
A	page 137 -----	9
A	LIU L ET AL: "KNBO3 TEMPERATURE-TUNED BLUE LASER" OPTICAL ENGINEERING, SOC. OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS. BELLINGHAM, US, vol. 38, no. 11, novembre 1999 (1999-11), pages 1789-1793, XP000928186 ISSN: 0091-3286 abrégé -----	1-11
A	-----	9
A	MATTHEWS D G ET AL: "BLUE MICROCHIP LASER FABRICATED FROM ND:YAG AND KNBO3" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 21, no. 3, 1 février 1996 (1996-02-01), pages 198-200, XP000629023 ISSN: 0146-9592 cité dans la demande le document en entier abrégé -----	1-13
A	-----	9
	----- -/--	

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	HOLLEMANN G ET AL: "FREQUENCY-STABILIZED DIODE-PUMPED ND:YAG LASER AT 946 NM WITH HARMONICS AT 473 AND 237 NM" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 19, no. 3, 1 février 1994 (1994-02-01), pages 192-194, XP000424362 ISSN: 0146-9592 cité dans la demande le document en entier -----	1-13
A	US 5 206 867 A (ESTEROWITZ LEON ET AL) 27 avril 1993 (1993-04-27) le document en entier -----	1-13

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4809291	A	28-02-1989	US 4739507 A	19-04-1988
US 5256164	A	26-10-1993	US 4860304 A	22-08-1989
			US 4953166 A	28-08-1990
			US 5265116 A	23-11-1993
			US 5402437 A	28-03-1995
			US 5365539 A	15-11-1994
			AT 110499 T	15-09-1994
			CA 1292797 C	03-12-1991
			DE 68917610 D1	29-09-1994
			DE 68917610 T2	15-12-1994
			EP 0327310 A2	09-08-1989
			EP 0571051 A1	24-11-1993
			ES 2059716 T3	16-11-1994
			JP 2005490 A	10-01-1990
			JP 2074861 C	25-07-1996
			JP 7112082 B	29-11-1995
			US 5115445 A	19-05-1992
			AU 637787 B2	10-06-1993
			AU 5199590 A	05-09-1990
			CA 2046637 A1	10-08-1990
			CN 1045200 A	05-09-1990
			EP 0457846 A1	27-11-1991
			JP 4503429 T	18-06-1992
			WO 9009688 A1	23-08-1990
US 3502958	A	24-03-1970	AUCUN	
US 4761059	A	02-08-1988	AUCUN	
US 5206867	A	27-04-1993	AUCUN	